

FERRAMENTAS PARA A INVESTIGAÇÃO DO DESEMPENHO DA FLOTAÇÃO NO MINAS-RIO*

Késsius Bortolan Menezes¹
Henrique Dias Gatti Turrer¹
Luis Cláuzio de Rennó Machador¹
Thokozani Malinga¹
Bolívar Bruno Otony Duarte¹
Julio César Silva¹
José Francisco Cabello Russo¹

Resumo

O complexo Minas-Rio da Anglo American iniciou suas operações em agosto de 2014. A usina de tratamento produziu, em 2016, cerca de 15,5 milhões de toneladas de concentrado. O minério, explorado em Conceição do Mato Dentro (MG), passa pelas etapas de cominuição, classificação, concentração e separação sólido-líquido antes de ser bombeado por 529 km até São João da Barra (RJ), onde é filtrado, estocado e embarcado para exportação. Durante a fase de projeto, a utilização de equipamentos pilotos com capacidade de centenas de quilos por hora foi de fundamental importância para verificação da viabilidade técnica do tratamento do minério. Contudo, a realização de um teste exigia um esforço muito grande, devido aos grandes volumes de minério necessários. Por isso, com o início das operações, os testes em escala de bancada começaram a ser mais explorados. Além deles, testes em mini planta piloto com capacidade de dezenas de quilos por hora são muito utilizados, pois permitem simular de forma simples diferentes circuitos. O trabalho tem por objetivo mostrar essa evolução histórica na utilização de ferramentas para avaliação do desempenho da flotação, com exemplos de resultados práticos obtidos, e como os mesmos influenciaram a tomada de ações que culminaram em melhorias industriais.

Palavras-chave: Minério de ferro, concentração, flotação, laboratório de processo, piloto.

TOOLS TO INVESTIGATE FLOTATION PERFORMAMNCE AT MINAS-RIO

Abstract

Anglo American's Minas-Rio complex started the operations in August 2014. The treatment plant produced about 15.5 million tons of concentrate in 2016. The Iron ore, operated in Conceição do Mato Dentro (MG), undergoes stages of comminution, classification, concentration and solid separation before being pumped for 529 km to São João da Barra (RJ), where it is filtered, stored and shipped. During a project phase, the use of pilot equipment with a capacity of hundreds of kilos per hour was of fundamental importance for the verification of the technical viability of the treatment of the ore. However, conducting a test required a very large effort due to the large volumes of ore required. Therefore, with the start of operations, bench scale tests began to be more exploited. In addition to them, mini pilot plant tests with capacities of tens of kilos per hour are widely used, show simulators of simple different circuits. The objective of this work is to show the historical evolution in the use of tools to evaluate flotation performance, with examples of practical results obtained, and how they influenced the actions that culminated in industrial improvements

Keywords: Iron ore, concentration, flotation, process laboratory, pilot

¹ Gerência de desenvolvimento de processos, Anglo American – Rodovia MG 10, Km 180, Córrego Pereira, Conceição do Mato Dentro, MG, Brazil.

1 INTRODUÇÃO

A usina de concentração do Minas-Rio, da Anglo American, possui capacidade para produção de 26,5 milhões de toneladas naturais por ano de *pellet feed*. O minério é extraído da jazida da Serra do Sapo em Conceição do Mato Dentro, MG. O processamento contempla as etapas de cominuição, por britadores de mandíbulas e grelhas, britadores cônicos e peneiras, prensas de rolos, moinhos de bolas e hidrociclones, seguido por deslamagem, flotação, remoagem em moinhos verticais (para adequação da granulometria de transporte), espessamento, bombeamento por 529 km de mineroduto e separação sólido-líquido para embarque, conforme figura 1.

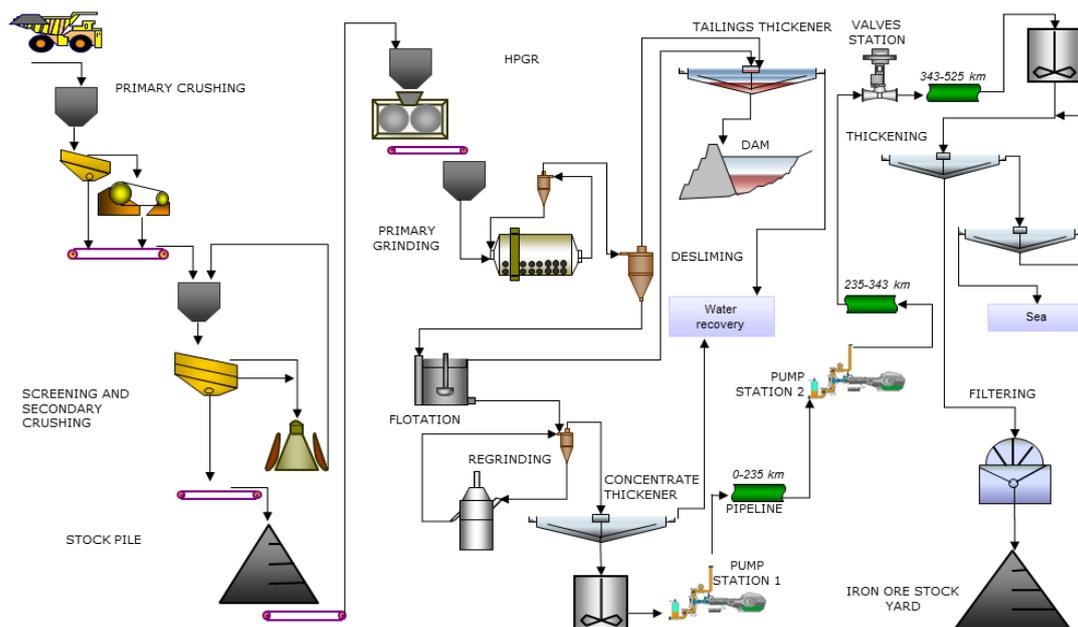


Figura 1. Fluxograma do processamento mineral no Minas-Rio.

O circuito de flotação do Minas Rio, figura 2, possui duas linhas paralelas com capacidade total para o tratamento de 6.154 t/h de minério. Cada linha possui 2 condicionadores e 11 células de 160m³ com aeração forçada da FLSmidht. Os tanques de flotação estão dispostos numa configuração para garantir as etapas de desbaste, recuperação primária e secundária, além das de limpeza primária e secundária.

As principais ferramentas usadas na fase de projeto, ou seja, antes do início das operações da usina, para avaliar o desempenho da flotação consistiam em testes de bancada e escala piloto. Exemplos de avaliações envolvendo testes de bancada podem ser encontrados em Turrer *et al.* (2013) ou Turrer *et al.* (2014a) e piloto em Turrer *et al.* (2014b).

A utilização de testes em escala piloto possibilitou a verificação da viabilidade técnica do tratamento do minério de diferentes partes da jazida, durante a fase da pré-operação.

Atualmente, após quase dois anos de operação, a quantidade de avaliações usando os equipamentos em escala piloto reduziu sensivelmente, devido à elevada taxa de alimentação necessária para operar esses equipamentos, que é na ordem de 300 a 800 kg/h.

Por isso, testes em bancada começaram a ser mais explorados e continuam sendo muito usados, mas apresentam algumas restrições, devido às dificuldades de simular, por exemplo, o efeito da carga circulante.

Assim, a mini planta piloto (MPP), figura 3, começou a ser usada mais intensamente para as diversas avaliações conduzidas pela equipe de desenvolvimento de processo. Esse equipamento apresenta algumas importantes vantagens, quando comparada à equipamentos de escala piloto tradicionais: 1) necessita de menor quantidade de material, entre 5 e 25 kg/h, que podem ser facilmente coletados diretamente no circuito industrial; e testados tal qual; 2) maior facilidade de controle, resultando em dados mais precisos e necessitando de menos pessoas para operar; 3) maior flexibilidade para avaliar diferentes circuitos e tamanho de equipamentos.

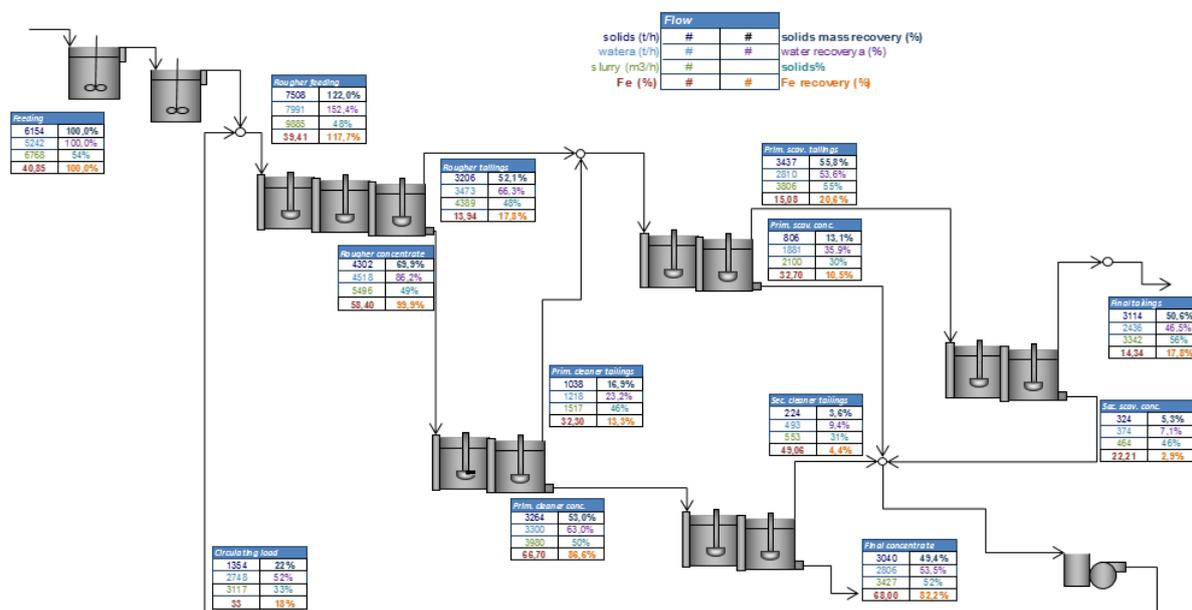


Figura 2. Fluxograma de projeto da flotação no Minas-Rio.

Este trabalho tem, portanto, o objetivo de se demonstrar a importância das ferramentas utilizadas para desenvolver os testes de flotação realizados na fase de projetos do Minas-Rio e atualmente, na fase operacional.



Figura 3. Mini Planta Piloto (MPP)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

- Estudo de caso I (testes em escala piloto):

Em escala piloto, a operação dos principais circuitos foi realizada de forma contínua, considerando todas as etapas do fluxograma previsto para a usina industrial com amostras de Itabirito compacto, semi-compacto e friável, previstos na alimentação do Minas-Rio. As amostras foram coletadas de diversos locais do depósito e de profundidades diferentes. O objetivo era a composição de amostras representativas das diferentes regiões e/ou fases da Mina a fim de se construir uma curva de desempenho para recuperação em massa em função do teor de Fe alimentado no ROM (*Run of Mine*). As amostras foram então britadas, peneiradas, moídas, deslamadas e, finalmente, flotadas. Todo o processo foi desenvolvido em escala piloto. Cada uma destas amostras representava uma região e/ou fase da Mina.

- Estudo de caso II (testes MPP):

O objetivo deste estudo é o de apresentar alguns resultados obtidos em investigações conduzidas usando-se a MPP para o tratamento de minério de ferro. As amostras minerais foram coletadas na usina de concentração no amostrador da alimentação da flotação, em tubulação anterior aos condicionadores. As amostras foram coletadas em dias de operação normal, para garantir uma representatividade adequada das amostras. Foram usadas diferentes amostras em cada campanha de teste.

Os ensaios de flotação foram feitos em equipamento da Eriez com células de 1700 ml. Os parâmetros operacionais do equipamento, como aeração, agitação e nível de espuma foram otimizados no primeiro teste de cada campanha, ou seja, o teste padrão. Nos demais testes esses parâmetros somente eram alterados caso estivessem comprometendo significativamente e visualmente o desempenho do teste. Soluções a 1% de amido de milho Flokit 18 da Kowalki e de amina EDAC da Clariant foram usados. O amido foi adicionado no tanque de condicionamento enquanto a amina foi adicionada na alimentação rougher e na cleaner, numa proporção de aproximadamente 70 e 30% respectivamente. As dosagens de cada reagente e o pH de flotação foram alterados em função da campanha. A taxa de alimentação e número de células foram definidos com base no tempo de residência objetivado em cada etapa. Amostragem para controle da densidade e volume de polpa dos principais fluxos (alimentação, rejeito, concentrado e carga circulante) foi realizada num intervalo entre 15 e 30 minutos. Essas amostragens objetivaram verificar o momento em que a estabilidade do circuito foi atingida. A amostragem do rejeito e do concentrado para determinação do desempenho foi feita também, ininterruptamente, após a estabilidade do circuito. A amostra da alimentação para determinação do desempenho do teste foi obtida com alíquotas retiradas de meia em meia hora após estabilização do circuito. As amostras dos demais fluxos, necessários para reconciliação dos dados de todo o circuito, foram obtidas uma única vez no fim do teste. Esses procedimentos de amostragens foram realizados em todos os testes, com exceção daquele com variabilidade da qualidade da alimentação.

A reconciliação dos resultados experimentais foi feita com o programa Algosys Bilmat 10.0.

Os ensaios para determinação da composição química das amostras foram realizados por fluorescência de raios-X de pastilha fundida com equipamento Axios da Panalytical.

- Estudo de caso III (testes em bancada):

Foi realizado um ensaio com o objetivo de avaliar o efeito da variação de alguns parâmetros operacionais para simular o desempenho da etapa de flotação. Para isto foi coletada uma amostra representativa do UF da etapa de deslamagem da Usina de Beneficiamento. Primeiramente foi realizada a análise química da amostra inicial via fluorescência de raios-X. Em seguida foram propostos testes de flotação em bancada, até a exaustão da espuma objetivando observar os efeitos de diferentes dosagens de amina, de amido, pH e até mesmo o tipo de água utilizada (reutilizada do processo e nova). Os testes foram feitos em cuba da CDC de 4,5 L, com percentuais de sólidos no condicionamento e na flotação em 60 e 40%, respectivamente, amido Flokit 16 da Kowalski gelatinizado com soda na razão de 5:1 e amina 7500 da Clariant à 1% condicionados por 5 e 1 minutos, respectivamente, agitação controlada em 1.200 e 1.500 rpm no condicionamento e na flotação, respectivamente e aeração ajustada para 2 LPM.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

- Estudo de caso I (testes em escala piloto):

Os resultados para os testes em escala Piloto forneceram uma curva de recuperação em massa (%RM) em função do teor de ferro no ROM, que passava bem próxima do ponto que representa a premissa de projeto, mostrando que a Planta Piloto estava adequada para a simulação de testes industriais com assertividade.

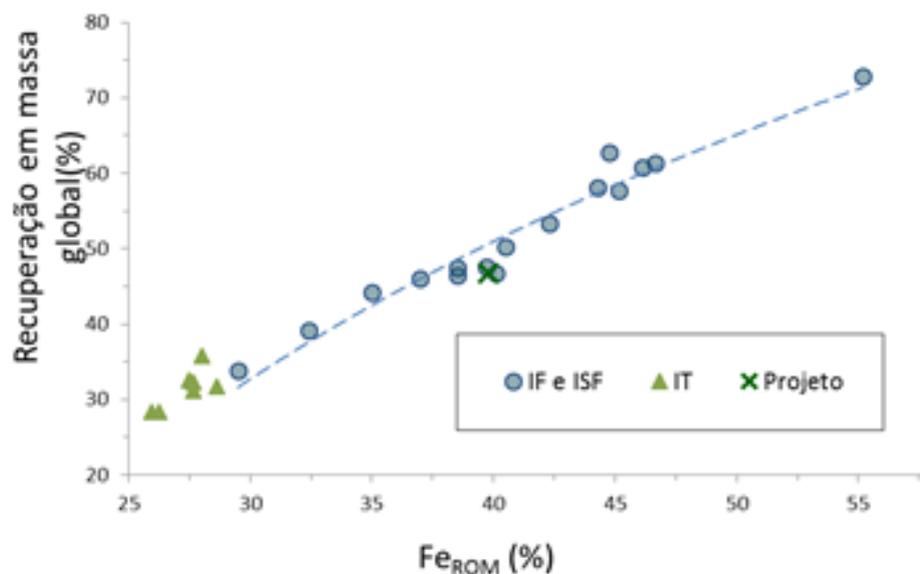


Figura 4. Gráfico %RM vs %Fe ROM

- Estudo de caso II (testes MPP):

O baixo tempo de residência necessário para flotação do minério de ferro neste equipamento, resultou na primeira dificuldade operacional. Para tentar contornar esse problema, duas opções foram testadas:

- Inserção de um componente na célula para diminuir o volume da célula;
- Existência de particulado grosseiro, que causava o entupimento das mangueiras e/ou sedimentação do material nas células;

A primeira opção afetou negativamente o desempenho. O componente não se encaixava perfeitamente na célula, deixando algumas frestas que formavam canais preferenciais de escoamento do flotado e transbordavam no compartimento de retirada do afundado. Esta opção foi viabilizada com a retirada deste componente e a utilização de taxas mais altas e com % sólidos mais altos.

A segunda opção foi viabilizada com a retirada de particulado acima de 0,6 mm. Esta premissa passou a ser adotada em todos os testes.

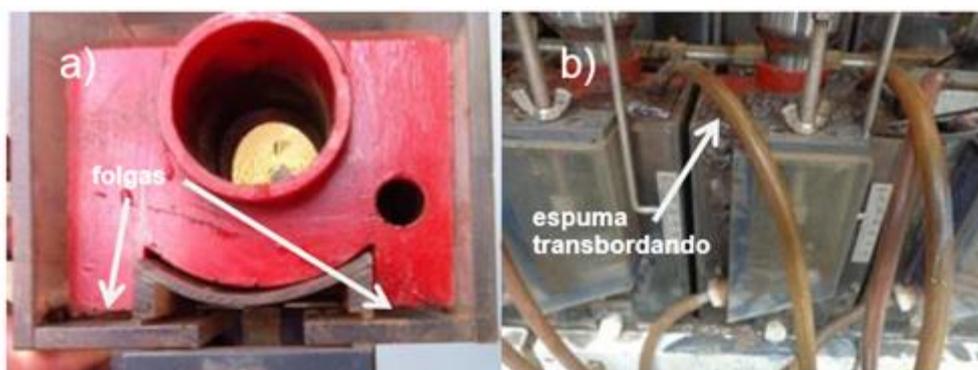


Figura 5. Agentes dificultadores

A estabilização do circuito ocorreu após 05 horas após início do teste, com a estabilização da carga circulante e com a estabilização da taxa de alimentação.

A eficácia da MPP para a avaliação do desempenho da flotação de minério de ferro do Minas-Rio foi verificada através da realização de testes com minério que apresentava características próximas das consideradas como premissa para o projeto, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros comparativos entre resultados obtidos com a MPP e números de projeto

		Projeto Minas-Rio	Resultados de testes simulando o circuito do projeto	
			Replica 1	Replica 2
Alimentação	%Fe	39,8	39,0	38,2
Concentrado	%SiO ₂	0,9	1,3	1,0
Desempenho	Recuperação Fe (%)	82,2	83,3	84,6
	Índice de seletividade de Gaudin	20,0	19,0	22,5
	Razão de enriquecimento	1,71	1,76	1,78

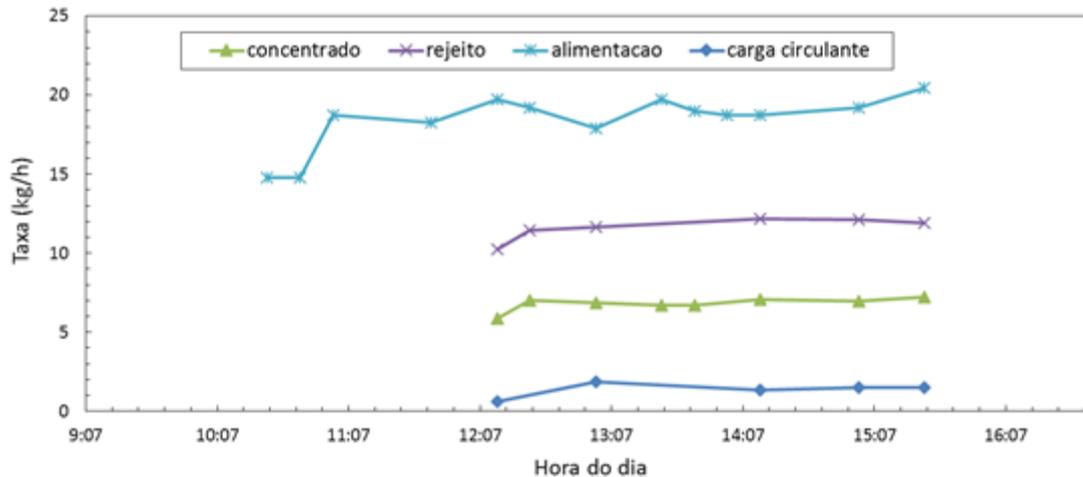


Figura 6. Acompanhamento da taxa dos principais fluxos durante um teste com a MPP.

Um outro exemplo de utilização bem sucedida da MPP foi na avaliação do efeito da variabilidade da qualidade do material alimentado na flotação. Testes em bancada impossibilitam a avaliação de tal efeito por serem feitos em batelada. Testes piloto devem ter o circuito amostrado para avaliação do seu desempenho somente no momento da estabilidade. Porém, a baixa taxa de alimentação da MPP aliada ao pequeno tempo necessário para testes permite a coleta de todo o concentrado e rejeito produzidos. Nessa avaliação um teste realizado nas condições usuais foi comparado com outro em que a cada hora a qualidade do material de alimentação era alterada.

Os resultados mostraram que durante o período de estabilidade de qualidade da alimentação, a taxa de produção rapidamente alcançou o patamar calculado, sofrendo pequenas alterações até que outros materiais começaram a ser alimentados. Nesse momento, as variáveis operacionais, como por exemplo, alturas das camadas de espuma, não foram modificadas. O primeiro material alimentado, mesmo com teor de ferro muito próximo do anterior, já ocasionou uma forte instabilidade, devido às outras diferenças, como teor de alumina, granulometria, mineralogia, etc. As mudanças que se sucederam contribuíram ainda mais para o aumento da variabilidade. Além disso, outro fato que chamou a atenção foi a queda na qualidade do concentrado, que foi de um teor de sílica de 1,0% para 2,6%, respectivamente, nos testes sem e com variabilidade do material alimentado. Apesar das diferenças, ambos os testes foram alimentados, em média, com teor de ferro entre 37 e 38%.

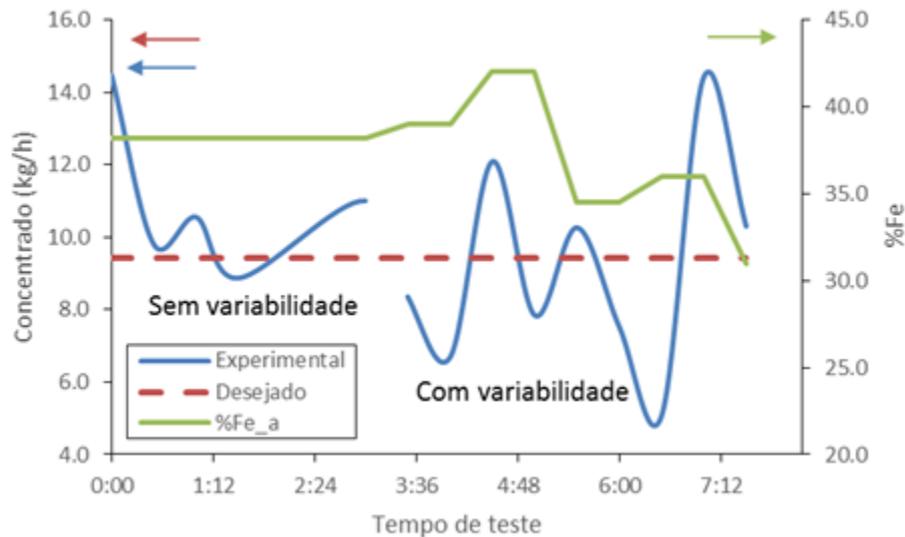


Figure 7. Efeito da variação da qualidade de alimentação na taxa de produção do concentrado.

- Estudo de caso III (testes em bancada):

Os testes realizados no ensaio proposto para avaliação do efeito de determinados parâmetros operacionais para simular o desempenho da etapa de flotação, possibilitaram a realização de um DOE (*design of experiments*). A Tabela 2, abaixo, traz os valores considerados para cada parâmetro a ser testado.

Tabela 2. Programação dos testes

Testes			
Amido	Amina	pH	Água
450	180	9,8	Recirculada
650	260	10,3	Destilada
650	180	9,8	Destilada
450	180	10,3	Destilada
650	180	10,3	Recirculada
450	260	9,8	Destilada
450	260	10,3	Recirculada
650	260	9,8	Recirculada
650	260	9,8	Recirculada

Os resultados dos efeitos principais confirmaram os resultados esperados: condição ótima para recuperação metálica é oposta àquela para o percentual de sílica no concentrado. A qualidade da água mostrou um maior efeito para as duas respostas analisadas. Dosagem de amina e pH tiveram, praticamente, o mesmo efeito, secundário, e a dosagem de amido foi o que menos influenciou nos resultados obtidos:

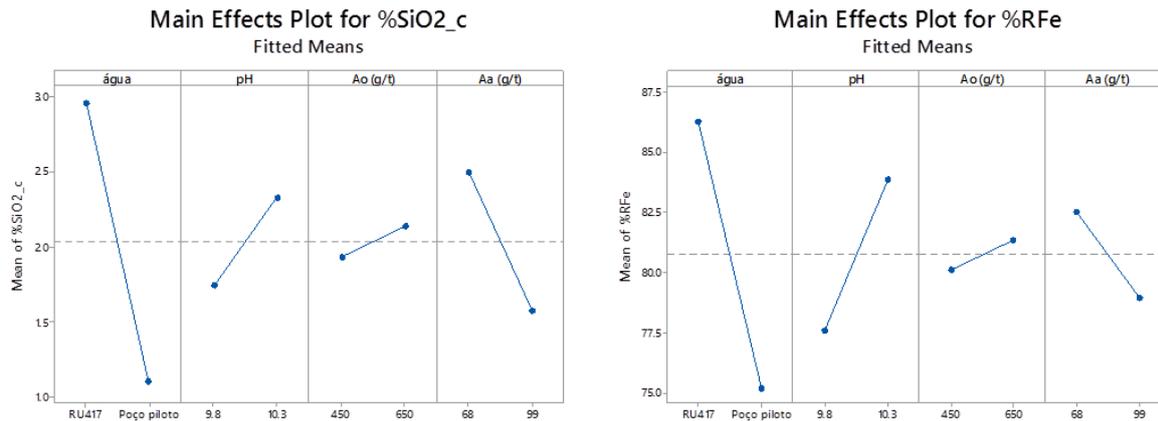


Figura 8. DOE (parâmetros avaliados)

4 CONCLUSÃO

Os testes de flotação conduzidos no Minas-Rio durante a fase de comissionamento da Usina de Beneficiamento e durante as operações foram e continuam sendo de suma importância para a garantia do negócio e para o desenvolvimento de novas tecnologias. A aplicação da metodologia e das ferramentas e equipamentos adequados também são, pois permitem a entrega de resultados compatíveis com aqueles a serem obtidos na Usina de Beneficiamento e em tempo adequado. A Planta Piloto foi importante para o comissionamento e desenvolvimento da Planta de Beneficiamento, pois ela permite um *scale-up* mais aderente e mais adequado, com capacidade de amostras maiores e mais representativas ao do ambiente industrial. A desvantagem da Planta Piloto em relação aos outros métodos seria o maior tempo para desenvolvimento de um teste impossibilitando testar diversas condições ao mesmo tempo. Seria inviável, ainda, o conhecimento do tempo de estabilização do processo obtido na mesma uma vez que são massas muito maiores em relação àquelas que obtemos em escala de bancada e de Mini Planta Piloto. Os testes realizados em Mini Planta Piloto já é bastante flexível em relação à desvantagem tida pela Planta Piloto pois permite se conhecer o tempo de estabilização do processo e avaliar a influência de pequenos ajustes realizados após esta estabilização. Porém também é complexa e permite, na maioria das vezes, somente a execução de um teste diário. Já a escala de bancada permite a execução de até 20 testes de flotações por dia, podendo avaliar de forma rápida e consistente ajustes operacionais, influência de determinada litologia num processo, testes de reagentes (qualidade e custo), etc. Porém não é um teste que possui um *scale-up* tão favorável quanto o da Planta Piloto para a Usina de Beneficiamento pois é um ambiente idealmente controlado.

REFERÊNCIAS

- 1 TURRER, H.D.G, GONZAGA, F.H.P., SILVA, J.C., MENEZES, K.B., ALMEIDA, J.A., SAWASATO, E.Y., GUIMARÃES, F.R., MAGALHÃES, C.R., DIAS, G.S. (2014a) Avaliação geometalúrgica de amostra da Serra do Sapo. In: 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, 8p.
- 2 CRISTIE, T., BRATHWAITE, B. (1997) Mineral commodity report 15 – iron. New Zealand: Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd.
- 3 LOYOLA, L.M., SALUM, A., Gonçalves, K.L.C. (2007) Mini planta-piloto de flotação da CVRD: estudo comparativo com plantas industriais. In: XXII ENTMME/VII MSHMT, Ouro Preto, p.389-397.

- 4 TURRER, H.D.G., MENEZES, K.B., GONZAGA, F.H.P., SILVA, J.C., ALMEIDA, J.A., MAGALHÃES, C.R., RUSSO, J.C., PIMENTEL, D.A., MAZZINGHY, D.B (2014b) Concentração magnética para recuperação do ferro contido no rejeito da flotação. In: 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, 9p.
- 5 TURRER, H.D.G., MENEZES, K.B., MAGALHÃES, C.R., MAZZINGHY, D.B. (2013) Comportamento e efeito do TiO₂ no tratamento do minério de ferro. In: XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, Goiânia, 9p.